

文章编号: 2095-4980(2017)02-0172-07

星载太赫兹雷达碎片预警技术

国爱燕¹, 高文军^{1,2}, 徐明明¹, 周傲松¹

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2.北京市电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094)

摘要: 由于地球同步轨道(GEO)的衰减周期长, 累积效应突出, 空间碎片对卫星安全产生日益严重的威胁, 特别是地基设备无法观测的危险空间碎片。根据碎片分布与运动特性, 开展地球同步轨道星载太赫兹雷达碎片预警技术研究。针对工作波长、目标尺寸与雷达截面积(RCS)、观测范围与工作方式进行论证, 完成雷达系统方案和仿真分析。雷达采用有源相控阵天线, 天线尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$, 工作频率为 140 GHz , 平均功率为 190 W 。雷达能够在方位与俯仰 $\pm 15^\circ$ 、距离为 $1.95\sim 24.12\text{ km}$ 内搜索与跟踪尺寸为 $6.8\text{ mm}\sim 15\text{ cm}$ 的碎片, 并对将要产生的撞击进行预警, 预警时间 $4\sim 35\text{ s}$ 。

关键词: 地球同步轨道; 星载雷达; 危险空间碎片; 太赫兹; 搜索; 跟踪; 预警

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0172

Space based terahertz radar for debris approach warning

GUO Aiyun¹, GAO Wenjun^{1,2}, XU Mingming¹, ZHOU Aosong¹

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2.Beijing Engineering Research Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the long decay period, space debris in Geosynchronous Earth Orbit(GEO) continue to accumulate, and threaten the safety of spacecraft, especially the dangerous debris which cannot be observed from ground based instruments. According to the distribution and motion characteristics of debris, a space based terahertz radar for debris approach warning is studied. Radar Cross Section(RCS), wavelength, detection range and working process of the radar system are studied. Design and simulation results are presented. The radar carried by a geosynchronous earth orbit satellite utilizes an active phased array of the size $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$, with working frequency of 140 GHz and average power consumption of 190 W . The radar can search and track debris of diameter $6.8\text{ mm}\sim 15\text{ cm}$ in the cone of azimuth $\pm 15^\circ$, pitching $\pm 15^\circ$, and the range of $1.95\sim 24.12\text{ km}$, and can warn the spacecraft at least $4\sim 35\text{ s}$ before the collision happens.

Keywords: Geosynchronous Earth Orbit; space based radar; dangerous debris; terahertz; searching; tracking; warning

由于轨道位置特殊, 地球同步轨道(GEO)卫星在通信、导航、预警、电子侦察、中继等军事领域占有极其重要的战略地位, 是确立信息优势、主宰战斗空间的神经中枢, 但因为轨道衰减周期长, 碎片累积效应非常突出, GEO 卫星安全受到日益严重的威胁。危险空间碎片是指尺寸介于 $1\text{ mm}\sim 10\text{ cm}$ 之间的空间碎片, 采用地基设备(包括望远镜和雷达)无法观测和测定其轨道, 无论防护还是规避都比较困难。利用星载雷达对危险空间碎片进行探测和跟踪, 对可能产生的撞击进行预警, 航天器快速启动防护装置, 是解决上述问题的有效方法。各国都针对星载雷达进行了积极的探索: 俄罗斯 A. A. Tolkahev^[1]设计的 95 GHz 雷达能够探测的碎片尺寸最小, 但作用距离近, 尺寸、质量和功耗都很大; 美国 Kai Chang^[2]设计的 35 GHz 雷达尺寸虽小, 但带宽小, 测量精确度低; 中国李道京^[3]设计的 35 GHz 雷达的精确度最高, 但采用了 30 个尺寸为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的发射天线和 3 个尺寸为 $15\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的接收天线, 且阵列基线为 $3\sim 10\text{ m}$, 天线规模非常大, 专为空间站设计, 不适用于其他卫星平台。

上述雷达都针对低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)碎片的探测, 工作波长都在毫米波波段。LEO 碎片与雷

收稿日期: 2016-08-19; 修回日期: 2016-11-14

基金项目: 装备预先研究基金资助项目(9140A21080213HT05313)

达的相对运动速度接近 10 km/s, 即使作用距离达到 15 km, 从探测到撞击也仅有 1.5 s 的时间, 对雷达和航天器的响应时间提出了很高的要求。受限于目前毫米波功率源的水平、卫星平台对质量和功耗的限制, 利用毫米波雷达进行 LEO 碎片撞击预警是难以实现的。

对于 GEO 轨道, 碎片与雷达的相对运动速度仅为数百米每秒, 放宽了对雷达和航天器响应时间的要求, 更具有可行性, 有望更早实现天基雷达搭载试验。同时, 与毫米波相比, 太赫兹波的波长更短, 天线尺寸更小, 且经过几十年发展, 太赫兹频率源器件的功率水平和集成度有了大幅提高。目前已有多种针对地面和海上应用的太赫兹雷达系统的报道, 如, 2008 年美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制的 0.58 THz 成像雷达系统; 2008 年德国应用科学研究院研制的 220 GHz COBRA ISAR 成像系统; 2011 年中国工程物理研究院研制的 140 GHz 成像雷达系统^[4]; 2009 年意大利 SELEX Sistemi Integrati 公司发布的舰载多功能 G 波段(140~220 GHz)有源相控阵雷达系列: KRONOS-3D 和 EMPAR^[5]。

为促进太赫兹雷达在 GEO 碎片探测与预警中的应用, 本文根据 GEO 轨道碎片分布与运动特性, 开展星载太赫兹雷达碎片预警技术研究, 进行雷达系统指标论证和工作方式分析, 设计雷达系统方案和参数。

1 GEO 碎片分布与运动特性

美国空间监视网已可对 GEO 中尺寸大于 1 m 的空间目标进行编目, 并且针对 GEO 中尺寸介于 15 cm~1 m 之间的空间目标, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)都开展了相关观测项目, 大量的观测数据和研究表明^[6-9]:

1) 在不进行轨道控制的情况下, GEO 目标的轨道倾角小于或等于 15°。

不受控制的 GEO 目标围绕稳定的 Laplacian 面摆动(Laplacian 面的轨道倾角为 7.5°), 这个摆动是由地球的扁率、太阳以及月亮的摄动引起, 轨道倾角的摆动周期约为 50 年。以 GEO 轨道中初始轨道倾角为 0°的不受控目标为例, 在前 25 年, 其轨道倾角逐渐增加, 直至达到峰值 15°; 在接下来的 25 年, 轨道倾角逐渐减小, 直至回到初始的 0°倾角, 然后又开始新一轮摆动。根据进入升交点赤经的不同, 不受控目标的摆动也可能会出现异常, 但这种情况较少。

2) 大部分 GEO 能够正常工作的目标轨道面为赤道面, 即轨道倾角为 0°。

GEO 碎片属于不进行轨道控制的目标, 因此尺寸小于 15 cm 的 GEO 碎片的轨道倾角也应小于等于 15°。GEO 卫星在正常工作情况下, 能够进行轨道控制, 轨道倾角保持在 0°。因此, 如果 GEO 卫星和碎片发生撞击, 则撞击角度小于等于 15°。

撞击时的相对运动速度 v_{imp} 可表示为:

$$v_{\text{imp}}^2 = v_s^2 + v_d^2 - 2v_s v_d \cos \theta \quad (1)$$

式中: v_s 为卫星运动速度; v_d 为碎片运动速度; θ 为 v_s 与 v_d 的夹角。

取 GEO 轨道高度为 35 786 km, 则卫星和碎片的运动速度为 3.07 km/s。 θ 越大, 撞击速度越大, 取 $\theta=15^\circ$, 则雷达与碎片的相对运动速度为 801.4 m/s。

2 指标分析

1) 工作波长与目标雷达截面积

鉴于地面通信、雷达多选用 140 GHz (大气窗口), 相关元器件的技术成熟度较高, 因此星载太赫兹雷达的工作频率选择 140 GHz。为获得准确的目标雷达截面积(RCS), 要求目标尺寸和雷达工作波长

满足光学区条件, 即目标周长大于 10 倍工作波长。假设碎片为理想导体球, 球体直径与其对应的光学区工作波长、频率和 RCS 的关系如表 1 所示, 对于 140 GHz 工作频率, 直径大于 6.8 mm 的导体球都满足光学区条件。由于尺寸 15 cm 以上的碎片目标可由地基设备探测, 因此星载太赫兹雷达观测目标为尺寸介于 6.8 mm~15 cm 之间的 GEO 碎片, RCS 范围为 -44.39~-11.51 dBm²。

表 1 理想导体球尺寸与其对应的光学区波长、频率和 RCS

Table1 The ideal conducting sphere diameter and its corresponding wavelength, frequency and RCS in optical range

parameters	debris diameter/mm						
	3.0	5.0	6.8	20.0	50.0	70.0	150.0
wavelength/mm	0.94	1.57	2.14	6.28	15.70	21.98	47.12
frequency/GHz	319.0	191.0	140.0	47.7	19.1	13.6	6.4
RCS/dBm ²	-51.49	-47.08	-44.39	-35.03	-27.07	-24.15	-11.51

2) 观测范围与工作方式

观测范围包括方位和俯仰角范围、作用距离。

天球赤道坐标系中, 假设雷达所搭载卫星轨道倾角为 0° 时, 位置在卫星运行方向正前方, 观测范围中心轴线与卫星运动速度方向相同, 则可能产生撞击的碎片目标与雷达观测中心轴线的夹角不超过 15° , 因此设定雷达方位和俯仰角观测范围为 $\pm 15^\circ$ 。

雷达的作用距离方程为:

$$R^4 = \frac{P_t \tau' G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{SN} k T_e F L} \quad (2)$$

式中: P_t 为发射功率; τ' 为未压缩的脉冲宽度; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益; λ 为雷达工作波长, 为 2.14 mm ; σ 为目标 RCS, 范围为 $-44.39 \sim -11.51 \text{ dBm}^2$; R_{SN} 为信噪比, 发现概率 0.9 , 虚警概率 10^{-4} 时, 对应 R_{SN} 为 12 dB ; k 为玻尔兹曼常量 $1.38 \times 10^{-38} \text{ J/K}$; T_e 为有效噪声温度, 为 290 K ; F 为噪声系数, 为 4 dB ; L 为雷达损耗, 为 2 dB 。

目前太赫兹频率源器件包括真空器件、光学器件和固态半导体器件。固态半导体器件具有体积小、质量轻、功耗低、集成度高等优点, 适用于卫星平台。雷达发射机可采用基于肖特基二极管倍频器的有源相控阵天线的空间功率合成技术, 工作频率为 140 GHz 时, 每个单元发射功率为 $P_{ut}=125 \text{ mW}^{[10-11]}$ 。

天线发射功率取决于单元发射功率和单元个数。考虑星载平台对载荷尺寸和质量的限制, 要求相控阵天线尺寸 D 不超过 250 mm 。相控阵天线单元间距 d 与最大扫描角 $\phi_{\max}$ 关系如下:

$$d < \lambda / (1 + |\sin(\phi_{\max})|) \quad (3)$$

雷达方位与俯仰角的扫描范围为 $\pm 15^\circ$, 则单元间距应小于等于 1.7 mm 。为尽可能增大单元个数, 增大发射功率, 单元间距为 $d=1.7 \text{ mm}$, 单元个数为 $M=21\ 609$ 。

天线发射功率为:

$$P_t = P_{ut} M \quad (4)$$

天线增益为:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \rho A}{\lambda^2} \quad (5)$$

式中 A_e 为天线有效孔径面积, 等于孔径效率 ρ 与物理孔径面积 A 的乘积。 ρ 为 0.7 时, $G=50.84 \text{ dB}$ 。

将式(4)和式(5)代入式(2)可得:

$$R^4 = \frac{P_t G^2 \tau' \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{SN} k T_e F L} \quad (6)$$

式(6)中未确定的变量为脉冲宽度 τ' , 与雷达天线和工作方式有关。

为减小雷达的体积和质量, 收发应共用一幅相控阵天线。对于收发共用天线, 在发射时间内不能接收, 其最小作用距离可表示为:

$$R_{\min} = \frac{c\tau'}{2} \quad (7)$$

式中 c 为光速。

同时, 已知可能产生撞击的目标与雷达的最大相对运动速度不超过 $v_{\max}=801.4 \text{ m/s}$, 假设从确认目标会产生撞击到采取防护措施所需时间为 t_{active} , 则要求雷达作用距离大于最小响应距离:

$$R_{\text{react}} = v_{\max} (T_{\text{work}} + t_{\text{active}}) \quad (8)$$

式中 T_{work} 为雷达的工作周期。

雷达采用边搜索边跟踪工作方式, 假设 1 个工作周期内进行 1 次扫描、 N 次跟踪, 工作周期表示为:

$$T_{\text{work}} = t_{\text{search}} + N t_{\text{track}} \quad (9)$$

式中 t_{search} 和 t_{track} 分别由式(10)和式(11)计算:

$$t_{\text{search}} = M_{\text{search}} N_{\text{pulse_search}} (T_{\text{pulse}} + t_{\text{switch}}) \quad (10)$$

$$t_{\text{track}} = N_{\text{pulse_track}} T_{\text{pulse}} \quad (11)$$

式中: M_{search} 为搜索波束个数; $N_{\text{pulse_search}}$ 和 $N_{\text{pulse_track}}$ 分别为搜索与跟踪状态下每个波位驻留的脉冲数; T_{pulse} 为脉冲周期, 与雷达的最大不模糊距离有关, $T_{\text{pulse}} = 2R_u/c$, R_u 为脉冲宽度为 τ' 时由式(6)计算得到的 15 cm 目标作用距离; t_{switch} 为波束切换时间, 为 0.1 ms。

将式(9)、式(10)和式(11)代入式(8), 可得:

$$R_{\text{react}} = v_{\text{max}} \left(M_{\text{search}} N_{\text{pulse_search}} (T_{\text{pulse}} + t_{\text{switch}}) + N N_{\text{pulse_track}} T_{\text{pulse}} + t_{\text{active}} \right) \quad (12)$$

天线波束宽度为 $\theta_{\text{atna}} = 0.007 \text{ rad} (0.04^\circ)$, 扫描角度为 $\pm 15^\circ$, $M_{\text{search}} = 5625$ 。取 $N = 4$, $N_{\text{pulse_track}} = 100$, $t_{\text{active}} = 4 \text{ s}$ 和 $t_{\text{active}} = 3 \text{ s}$ 时, 脉冲宽度与作用距离之间关系如图 1 所示。星线表示碎片尺寸为 15 cm 时由式(6)计算得到的最大作用距离, 十字线表示碎片尺寸为 6.8 mm 时由式(6)计算得到最大作用距离, 正方形线表示由式(7)计算得到的最小作用距离, 圆圈线表示由式(8)计算得到的最小响应距离。

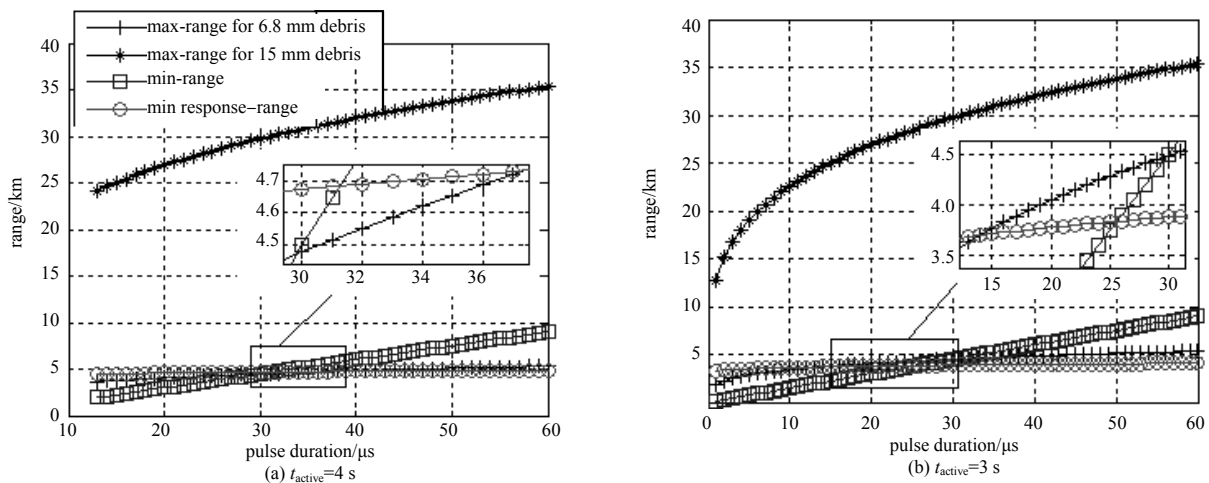


Fig.1 Relationship between pulse duration and detection range

图 1 脉冲宽度与作用距离的关系

由图 1(a)可知, $t_{\text{active}} = 4 \text{ s}$ 时, 在不同脉冲宽度下, 对于 15 cm 碎片的最大作用距离明显大于最小作用距离和最小响应距离, 都能够满足要求; 对于 6.8 mm 目标, 作用距离只有在 $\tau' < 30 \mu\text{s}$ 的情况下, 大于最近作用距离; 在 $\tau' > 38 \mu\text{s}$ 的情况下, 大于最小响应距离, 因此无法找到合适的脉冲宽度。由图 1(b)可知, $t_{\text{active}} = 3 \text{ s}$ 时, 对于 6.8 mm 目标的作用距离在 $\tau' < 30 \mu\text{s}$ 的情况下, 大于最近作用距离; 在 $\tau' > 13 \mu\text{s}$ 的情况下, 大于最小响应距离, 因此脉冲宽度可在 13~30 μs 之间选取。为尽量增大最大与最小作用距离之差, 延长雷达跟踪时间, 脉冲宽度选择为 13 μs , 对应的脉冲重复周期为 160.8 μs 。

根据上述分析可知, 对于 6.8 mm 目标, 作用距离为 1.95~3.64 km, 预警时间为 4 s; 对于 15 cm 目标, 作用距离为 1.95~24.12 km, 预警时间为 35.6 s。

3 系统仿真分析

雷达系统组成结构如图 2 所示, 由电源、热控、相控阵天线、数字波束形成、中频放大滤波、信号源和波控机组成。相控阵天线由阵面、收发组件和馈电网络组成。收发组件结构如图 3 所示, 中频信号源经功分器分为 2 路: 一路送入倍频链, 经过倍频、双工器后发射出去; 一路与接收信号进入谐波混频器, 下变频到中频。接收信号经过双工器后进入限幅器、低噪放和谐波混频器。

雷达测量参数包括距离、速度以及方位和俯仰角, 根据测量参数, 利用卡尔曼滤波对目标的运动轨迹进行预测, 引导雷达跟踪目标。

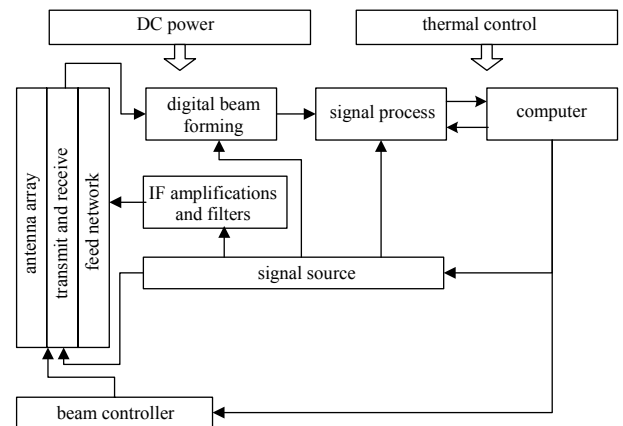


Fig.2 Schematic diagram of radar system

图 2 雷达系统组成结构

为在保持作用距离的同时获得高的距离分辨力,雷达采用脉冲压缩技术,距离分辨力取决于信号的瞬时带宽,即压缩后的脉冲宽度。雷达处于搜索模式时,采用 $B=300$ MHz 的窄带宽信号,有利于减少信号处理工作量和扫描时间。处于跟踪模式时,为提高距离分辨力,保证作用距离,采用 $B=5$ GHz 的大带宽信号。因此,搜索模式下的距离分辨力为 0.5 m,跟踪模式下的距离分辨力为 0.03 m。

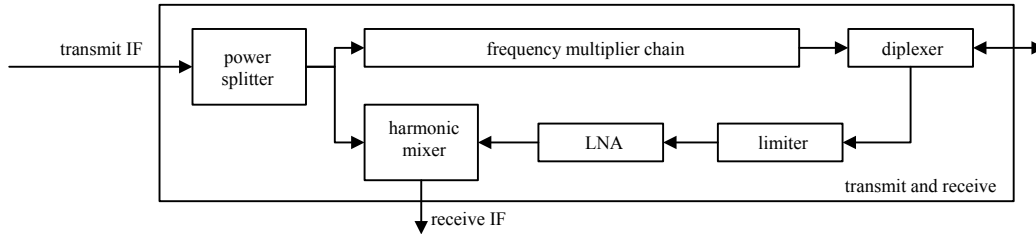


Fig.3 Schematic diagram of transmit and receive module
图 3 收发组件结构

雷达对目标距离的测量误差取决于信号的瞬时带宽和信噪比^[12]:

$$\sigma_r = \frac{(c/2B)\sqrt{L_p}}{k_t\sqrt{2R_{SN}n}} \quad (13)$$

式中: k_t 为距离测量斜率, $k_t \approx 1$; n 为脉冲积累数; L_p 为脉冲积累损失。搜索过程中每个波位只有一个脉冲,不存在脉冲积累,因此可以不考虑 n 和 L_p 的影响,测距误差为 0.08 m。跟踪过程中脉冲积累数 $n=100$,非相干脉冲积累损失 4.5 dB^[12],则测距误差为 8.93×10^{-4} m。

利用数字波束形成技术,通过比幅单脉冲的方法,测量目标的方位和俯仰角。角度分辨力取决于天线在方位与俯仰方向上的半功率波束宽度 0.007 rad。

测角误差取决于波束宽度和信噪比:

$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{atan}\sqrt{L_p}}{k_p\sqrt{2R_{SN}n}} \quad (14)$$

式中 k_p 为角度测量斜率, $k_p \approx 1.6$ 。搜索过程中测角误差为 7.77×10^{-4} rad,跟踪过程中测角误差为 1.30×10^{-4} rad。

利用基于多普勒频率的测速法,通常采用距离-多普勒滤波方法提取回波信号的多普勒频移,则径向速度分辨力为^[13]:

$$\Delta v_r = \frac{\lambda \Delta f_d}{2} \quad (15)$$

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_{obs}} = \frac{1}{nT_{pulse}} \quad (16)$$

式中: Δf_d 为多普勒频移精确度; T_{obs} 为总观察时间。搜索过程中的径向速度分辨力为 6.66 m/s,跟踪过程中的径向速度分辨力为 0.066 m/s。

测速误差可表示为^[12]:

$$\sigma_v = \frac{\lambda\sqrt{L_p}}{2T_{obs}\sqrt{2R_{SN}n}} \quad (17)$$

搜索过程测速误差为 0.59 m/s,跟踪过程的测速误差为 9.84×10^{-4} m/s。

正常模式下,雷达工作周期为 1.5315 s,在 1 个工作周期内对方位和俯仰 $\pm 15^\circ$ 范围进行 1 次完整搜索,用时 1.4672 s;对同一目标进行 4 次跟踪,每次跟踪 0.016 s,用时 0.0643 s。对于 6.8 mm 目标,作用距离为 $1.95 \sim 3.635$ km,在雷达波束内的时间大于 2.1 s。对于 15 cm 目标,作用距离为 $1.95 \sim 24.12$ km,在雷达波束内的时间大于 27.7 s,利用卡尔曼滤波对 2 种目标的跟踪误差进行仿真,结果如表 2 所示,由于作用时间短, 6.8 mm 目标的跟踪误差明显大于 15 cm 目标。

针对上述问题,设计了雷达的应急工作模式,一旦发现距离近、速度快或撞击概率高的一个或几个目标,暂时放弃搜索,对目标进行连续跟踪,其位置和速度的跟踪误差如表 3 所示。

雷达系统参数如表 4 所示，包括卫星轨道参数、天线参数、信号特性、工作模式和测量参数。

表 2 卡尔曼滤波的位置与速度误差

Table2 Position and velocity error of Kalman filtering

elements	debris with diameter 6.8 mm			debris with diameter 15 cm		
	x axis	y axis	z axis	x axis	y axis	z axis
position error/m	168.20	168.40	412.20	13.83	13.86	33.97
velocity error/(m·s ⁻¹)	46.990	46.950	115.000	3.874	3.875	9.490

表 3 连续跟踪卡尔曼滤波的位置与速度误差

Table3 Position and velocity error of continuous Kalman filtering

elements	debris with diameter 6.8 mm		
	x axis	y axis	z axis
position error/m	7.032	7.038	17.24
velocity error/(m·s ⁻¹)	2.136	2.135	5.231

表 4 雷达系统参数

Table4 Radar system parameters

parameters		value	parameters		value
satellite	orbit	GEO	signal	pulse duration	13 μs
	altitude	35 786 km		pulse cycle	160.8 μs
	inclination	0	working mode	regular	track while search, working period: 1.53 s, search time:1.47 s, track time: 0.06 s, track 4 times in every working period
	eccentricity	0		emergency	continuous tracking one or more debris
	type	active phased array	measurement	debris diameter	6.8 mm–15 cm
antenna	size	250 mm×250 mm		range	6.8 mm debris: 1.95–3.64 km 15 cm debris: 1.95–24.12 km
	element number	148×148		angle range	azimuth: ±15° pitch:±15°
	spacing	1.7 mm		warning time	6.8 mm debris: 4 s 15 cm debris: 35.6 s
	beam width	0.007 rad		range resolution	search: 0.08 m, track:0.89 mm
	gain	52 dB		angular resolution	0.007 rad
signal	type	chirp pulse compression		velocity resolution	search 6.66 m/s, track 0.066 m/s
	frequency	140 GHz		regular mode accuracy	debris with diameter 6.8 mm: position accuracy 412 m, velocity accuracy 115 m/s debris with diameter 15 cm: position accuracy 34 m, velocity accuracy 9.510 m/s
	band width	search: 300 MHz, track: 5 GHz		emergency mode accuracy	position accuracy 17.2 m, velocity accuracy 5.2 m/s

4 结论

针对 GEO 危险空间碎片分布和运动特性，结合当前毫米波和太赫兹技术水平，开展 GEO 星载太赫兹碎片预警雷达技术研究。雷达搭载 GEO 卫星，天线为有源相控阵天线，采用线性调频脉冲压缩体制，工作方式为边搜索边跟踪。雷达探测碎片尺寸为 6.8 mm~15 cm，搜索与跟踪的角度范围为方位和俯仰±15°，6.8 mm 碎片作用距离为 1.95~3.64 km，15 cm 碎片作用距离为 1.95~24.12 km，提前预警时间 3~35 s。雷达的角分辨率 0.007 rad，距离分辨率 0.08 m，速度分辨率 0.066 m/s，位置跟踪精确度 17.2 m，速度跟踪精确度 5.2 m/s，能够实现快速搜索和稳定跟踪。

参考文献：

[1] TOLKACHEV A A,ZOLOTAREV M M,LOUKIASCHENKO V I,et al. Space based radar to observe space debris[EB/OL]. (2013-04-23)[2016-08]. <http://www.sdl.usu.edu/conferences/smallsat/proceedings/12/ssc98/12/sscxii3.pdf>.

[2] CHANG K,POLLOCK M A,SKREHOT M K. Space-based millimeter-wave debris tracking radar[J]. Proceeding of SPIE, 1991(1457):257-266.

[3] 李道京,刘波,尹建凤,等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计[J]. 宇航学报, 2010,31(12):2746-2753. (LI Daojing,LIU Bo,YIN Jianfeng,et al. Analysis and design of spaceborne MMW radar for space debris observation system[J]. Journal of Astronautics, 2010,31(12):2746-2753.)

[4] 王瑞君,王宏强,庄钊文,等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013(4):1-17. (WANG Ruijun,WANG Hongqiang,ZHUANG Zhaowen,et al. Research progress of terahertz radar technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(4):1-17.)

[5] MOSCA S. A family of G-band active electronically scanned arrays for radar applications[C]// IEEE International Symposium on Phased Array System and Technology. [S.l.]:IEEE, 2010:785-788.

(下转第 182 页)